

디젤발전기의 병렬운전제어기에 관한 연구

박옥상\*, 송호신\*\*

\* STX(주) 기술연구소, \*\* 부산정보대학

A Controller Design for Parallel Operation of a Diesel Engine Generator

Park Ouk Sang\*, Song Ho Shin\*\*

\* STX Corporation, \*\* BUSAN COLLEGE OF INFORMATION TECHNOLOGY

**Abstract** - 본 논문에서는 디젤발전기의 병렬운전에 대해 소개하고 병렬운전을 수행하기 위한 조건들을 확인한다. 먼저 디젤발전기의 전달함수를 검토하고 디젤발전기의 특성을 용량별로 분석하여 일반화하며 주파수제어기를 설계한다. 계기용변류기(CT: current transformer)와 계기용변압기(PT: potential transformer)를 이용한 전류, 전압측정 회로를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검토하고 3상 전력과 주파수를 제어하는 병렬운전제어기의 설계 방안을 제안한다.

1. 서 론

최근 가정용 부하의 대형화로 인해 가정의 전력소비가 매년 증가하고 있고 월별로는 7, 8월의 전력수요의 급상승 등으로 인해 분산형 소용량 계통연계시스템에 대한 연구의 필요성이 증대하고 있다.

특히, 디젤발전기는 대부분의 중소형 규모의 발전시설에 널리 채용되어 있으며 설치와 관리가 용이한 장점으로 인해 비상용발전기의 용도로도 폭넓게 사용되고 있다. 비상용발전기는 수용량의 60%에 해당하는 발전용량을 갖고 있지만 정전 대비의 용도로만 제한할 경우에는 실제의 가동시간이 작아 발전설비의 효율성이 떨어지고 유지·보수에 상대적으로 많은 비용을 유발한다.

설비의 효율성 향상을 위하여 비상발전기를 여름철 냉방부하 보상용 전원으로 개발하고 적절한 발전부하와 발전기 운전시간을 일정규모로 유지하기 위해서는 계통과 연결된 상태에서 부하에 전력을 공급하도록 발전기를 운전할 수 있어야 한다.

계통연계운전의 방식으로는 발전전력 일정제어(base load control), 수전전력 일정제어(constant import control) 및 최대치 보상제어(peak shaving control) 등이 있고 병렬운전을 하기 위해서는 전력부하(bus)와 연결을 위하여 차단기투입 이전에 발전기의 위상, 전압 및 주파수를 모선과 일치시키는 자동동기 투입제어(automatic synchronize control)가 필요하고, 모선과 연결된 뒤에는 유효성 부하 분담제어(kW load sharing)와 무효전력 분담제어(kVar load sharing)가 요구된다. 따라서, 제한된 기능의 비상용발전기를 부하 보상용 전원으로 활용하기 위해서는 발전기 병렬운전 제어가 필수적이다. 그러나 기존의 제어를 이용할 경우 제어장치 규모의 확대를 초래하게 되어 비용측면에서 실현성을 보장받을 수 없다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 고성능, 저가의 프로세서를 적용하여 발전기와 모선의 전압 및 전류를 계측하여 자동병렬운전을 수행하는 제어기를 설계한다.

2. 본 론

2.1 병렬운전(parallel operation)

병렬운전이란 2대 이상의 발전기 사이 또는 계통(grid)과 연계하여 부하에 전력을 공급하며 안정된 동기운전을 하는 것으로서 디젤발전기의 병렬운전을 위해 다음과 같은 조건을 요구한다.

① Voltage match : 병렬 운전하고자 하는 System

간의 전압이 동일하거나 전압차가 제한된 범위내내여야 한다.(1~5% 이내) 발전기의 전압은 발전기 여자전압을 자동전압조정기(AVR: automatic voltage regulator)에서 자동으로 또는 외부 전압조정 장치로써 수동으로 조절할 수 있다. 전압이 다른 두 발전기가 병렬 운전할 경우, 각 발전기 전압간에는 전위차가 발생하여 발전기 사이를 순환하는 무효전류를 발생시켜 역률이 변하고 효율이 감소한다.

② Frequency match : 병렬운전 System간의 주파수가 동일하거나 주파수차가 제한된 범위내내여야 한다.(0.2% 이내) 주파수가 다를 경우, 발전기 출력의 주기적 진동 및 권선의 비정상적인 가열현상을 일으킨다. 주파수 조정은 엔진의 조속기(speed governor)에 의해 이루어진다.

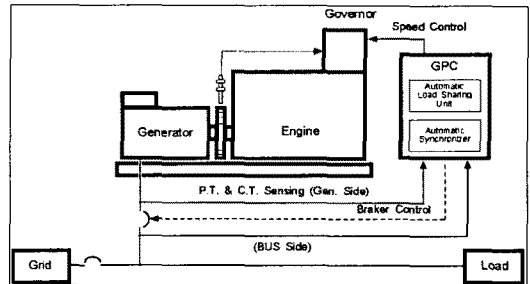


그림 1. 발전기의 병렬운전 블록도  
Fig. 1 Block Diagram for Parallel Operation of a Diesel Engine Generator

③ Phase angle match : 병렬운전 시스템간의 위상각이 동일하거나 위상차가 제한된 범위내내여야 한다.(±10% 이내) 전압의 위상이 다를 경우, 위상차에 의한 전류(유효전류)가 흘러 병렬 운전하는 발전기의 부하를 변동시켜 속도변화에 따른 발전기 난조의 원인이 된다. 위상각의 조정은 주파수와 동일하게 엔진의 조속기(speed governor)에 의해 이루어진다.

④ Speed droop : 엔진 조속기가 기계유압식일 경우, Speed droop(수하특성)을 가져야 한다. 부하변화에 대하여 속도 변동이 작은 것이 좋으나, 병렬운전의 경우 부하분담(load share)을 원활히 하자면, 적당한 Droop특성을 가져야 한다. 무부하에서 정격부하까지 Speed droop이 3~5% 정도에서 정해지며, 너무 적으면 부하분담이 어렵다.

Speed droop이란, 부하의 증가에 따라 속도 및 주파수가 증감하는 것을 말하며 식 (1)로 표현된다.

$$\%Droop = \frac{No-load\ speed - Full-load\ speed}{Full-load\ speed} \times 100 \quad (1)$$

⑤ Base load control : 발전전력 일정제어 방식은 운전효율을 최적화할 수 있어 가장 경제성이 높은 운전 방식으로 전력이 부족할 때에는 계통으로부터 공급받고 전력이 남을 경우 계통으로 공급한다. 최대 부하량을 계산하여, 발전기의 발전량을 설정한다. 발전기는 계통과 병렬 운전하면서, 부하 증가에 관계없이 설정 발전량만큼을 부하에 공급한다.<sup>[1]</sup>

## 2.2 디젤 발전시스템의 구성

### 2.2.1 디젤엔진의 모델링

디젤엔진은 매우 복잡한 시스템으로써 수학적인 모델링을 하는데는 많은 어려움이 있다. 디젤엔진의 모델링에는 몇가지 방법이 있으나, 본 논문에서는 그림 2와 같은 비진동성 2차 계통으로 모델링하였다.

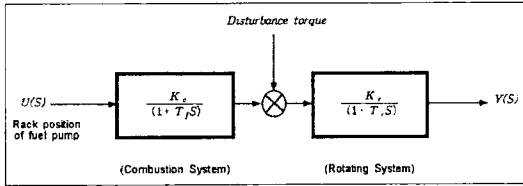


그림 2. 디젤엔진의 모델링  
Fig. 2 Modeling of a diesel engine

여기서,  $K = K_c K_p$ 는 전체시스템의 정상이득,  $T_c$ 는 연소계통의 시정수,  $T_r$ 는 회전계통의 시정수이다.<sup>[2]</sup>

### 2.2.2 조속기(speed governor)

디젤엔진은 압축착화식 내연기관으로서 실린더내의 압축된 공기에 노즐을 통해 분사된 연료의 폭발로 가동된다. 또한, 원래의 디젤엔진은 운전영역에 따라 그 파라미터 값의 변화가 크다. 따라서, 제어장치의 파라미터 값이 거의 고정되어 있을 뿐 아니라 비교적 단순한 제어알고리즘(비례제어)만을 가지고 있는 종래의 유압기계식 조속기로는 디젤엔진의 효율적인 속도제어를 행할 수 없게 되었다. 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 최근 마이크로 프로세서를 이용한 전자식 조속기 즉 디지털 조속기가 개발되어 폭넓게 사용되고 있다.<sup>[3]</sup>

그림 3은 기계식 조속기를 적용한 500kw급의 특정형(6L16XC-GEN) 디젤발전기의 블록도 및 전달함수이며, 그 특성방정식은 식 (2)와 같다.

$$s^5 + 213.1s^4 + 1.259 \times 10^4 s^3 + 2.523 \times 10^5 s^2 + 9.094 \times 10^4 s + 7.949 \times 10^6 = 0 \quad (2)$$

이 특성방정식의 근은 다음과 같다.

$$r = -1.327 \times 10^2, (-0.397 \pm 0.094) \times 10^2, (-0.019 \pm 0.06) \times 10^2 \quad (3)$$

즉, 모든 근은 음수(s-평면의 왼쪽에 위치)이므로 System은 안정하다고 할 수 있다. 이 예와 같이 디젤발전기의 속도제어시스템은 실용영역에서 안정된 특성을 가지도록 설계된다.

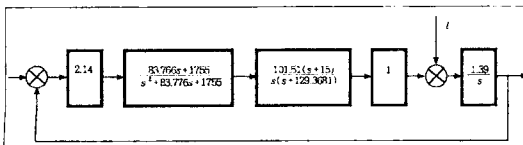


그림 3. 500kw급 디젤발전기  
Fig. 3 Modeling of the 500kW Diesel Gen.Set

### 2.2.3 주파수 제어기의 모델링

발전기의 병렬운전은 주파수, 위상각 그리고 부하분담을 위해서 발전기 출력주파수를 제어한다. 제어대상이 되는 디젤발전기를 출력 용량별로 모델링하기는 현실적으로 어렵다. 그래서, 디젤발전기는 식 (3)의 예와 같이 안정된 시스템으로 일반화하여 단순 회전질량체로 모델링하는 것으로 충분하다. 디젤발전기의 제어응답성은 발전기의 용량이 커질수록 시정수 증가로 인한 시간지연이 커지게 된다. 이러한 용량에 따른 변화를 병렬운전제어기에서는 비례계수(Kp)를 조절하여 대응한다. 즉, 응답성이 민감한 저용량의 발전기는 짧은 간격의 제어출력과 feedback 주기를 필요로 하고 응답성이 둔감한 대용량의 발전기는 상대적으로 긴 제어출력과 feedback 주기를 필요로 하는 것이다. 계통과 연결된 발전기는 수특성(speed droop)으로 인해 오버슈트의 발생은 자연스럽게 억제된다.

그림 4는 그림 3의 시스템에 PI제어기를 적용한 주파수 제어시스템을 나타낸다. 그림 5는 시뮬레이션의 결과를 나타낸다.

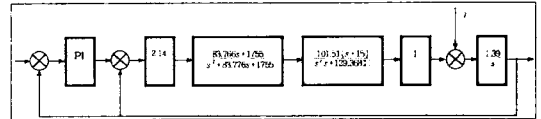


그림 4. 주파수 제어시스템  
Fig. 4 Modeling of the Frequency controller

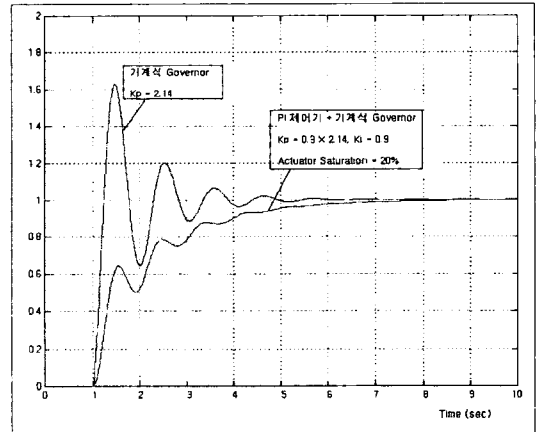


그림 5. 주파수 제어시스템의 계단응답  
Fig. 5 Step Response of the Frequency Controller

## 2.3 제어시스템의 설계

고전압, 대전류의 계통과 발전기의 전원신호를 측정하기 위해서는 절연과 노이즈 대책을 고려해야 한다. 이를 위해 3상의 신호에 각각 독립된 CT를 적용하였다.

제어용신호의 측정에는 시간에 따른 오차를 최소화하기 위하여 A/D변환기의 입력을 동시에 받기 위한 고려가 있어야 한다. 본 제어기는 9개의 아날로그 신호를 10μsec 주기로 측정하는 아날로그 스위치와 다채널 sample hold를 설계하였다. 다채널의 실패치 연산을 실시간으로 수행하기 위해서는 고속의 프로세서가 필요한데 500nsec의 고속A/D 컨버터, 타이머와 다양한 입출력기능을 내장하고 있는 TMS320F2406A를 선정하여 고성능의 제어를 소형화, 저가격화하여 구현하도록 설계하였다.

### 2.3.1 신호취출부

CT와 PT의 2차측에 접속된 신호를 OP Amp 소자로

직접 측정한다. PT의 권선비 1:30으로 하여 110VAC를 3.6VAC로 변환한다. CT의 권선비 2:200으로 하여 5A를 0.05A로 변환한다. 470ohm의 부하저항으로 5VAC의 최대치로 조정된다. 2차의 능동LPF(active low pass filter)를 적용하여 신호의 잡음을 제거하였다. 이때 LPF의 영향으로 위상각 1도 정도의 신호지연이 발생하는데 이는 전체 입력신호에 공통으로 적용되므로 무시할 수 있다. 그림 6은 신호검출부의 전단부분의 회로이고 식(4)는 회로에 적용한 LPF의 전달함수이다.

$$G(S) = \frac{G_o b}{S^2 + as + b} \quad (4)$$

단, 여기서  $G_o = K = \frac{1}{4nF} (\frac{1}{220k} + \frac{1}{220k})$

$b = \frac{1}{2nF \cdot 4nF \cdot 220K \cdot 220K}$  이다.

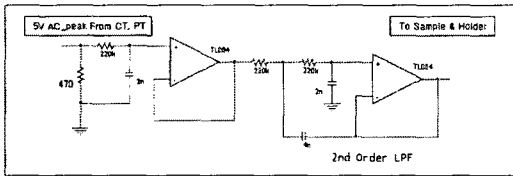


그림 6. 신호측정부 회로도

Fig. 6 Sensing Circuit of the Power Line Signal

### 2.3.2 전력계측

전력 계측에는 평균치 측정에 의한 방법과 최고치 측정에 의한 방법이 폭넓게 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 스위칭 부하 등에 의한 전력선의 파형왜곡이나 전원선의 단락 등에 의한 순간적인 신호변화를 검출하기 위해서는 실시간 실효치 계측이 필요하다. 최고치 연산법은 파형왜곡의 오차를 보상할 수 없어 정밀한 전력측정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 순시전압과 순시전류 입력을 식(5)와 같이 RMS 연산을 하여 구한 순시전력을 받기 동안 평균하여 피상전력(평균전력)을 구하였다. 이때 무효전력은 평균전력에 역률을 곱하여 구한다. 주파수와 위상은 정현파 입력신호를 구형파 변환회로를 통하여 CPU의 타이머로 입력하여 주파수를 구하고 시간차를 비교하여 위상차를 얻어 역률을 구한다.

$$\sqrt{\frac{\int_x^0 f(x)^2 dx}{\pi}} = 0.707 \quad (5)$$

$$P = P_r + P_s + P_r \quad \text{피상전력(평균전력)} P_{r,s,r} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (6)$$

### 2.3.3 제어기 구성

제안된 제어기는 발전기 제어반내에 설치되어 차단기 제어반과 직접적으로 연결되고, 엔진제어장치와 중앙감시장치와는 직렬통신으로 접속된다. 제어대상의 중요성과 더불어 제어기 또한 높은 신뢰성이 요구된다. 마이크로프로세서는 Texas Instrument사의 TMS320F2406A로 선정하였다. 디지털제어기 전용으로 설계되어 비교적 저가에 입수할 수 있고, 메모리와 다양한 주변장치를 내장하여 제어목적에 적합하고 제작원가를 절감하는 것이 가능하기 때문이다. 디지털 입출력을 확장하기 위해 Lattice사의 ISPLSI1048EA CPLD를 적용하였다. 11개의 외부 아날로그 입력과 2개의 아날로그 출력은 TMS320F2406A의 내장된 하드웨어를 사용하고, 7개의 디지털 입력과 15개의 디지털 출력은 CPLD에서 담당한다. 그림 7은 제작을 위해 설계된 발전기병렬운전 제어기의 구성을 나타내고, 그림 8은 설계된 제어기가 적용된 디젤발전기이다.

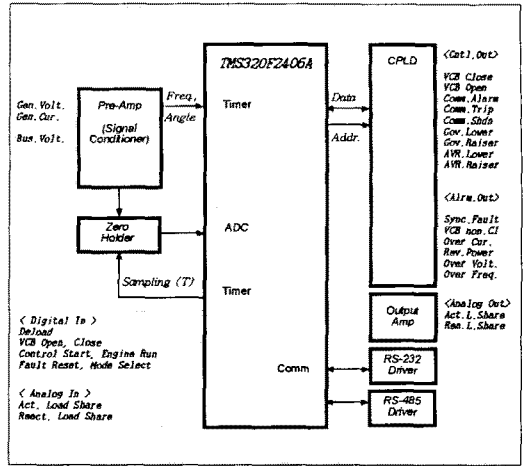


그림 7. 발전기 병렬운전제어기의 구성도

Fig. 7 Block diagram of the Parallel Operation Controller

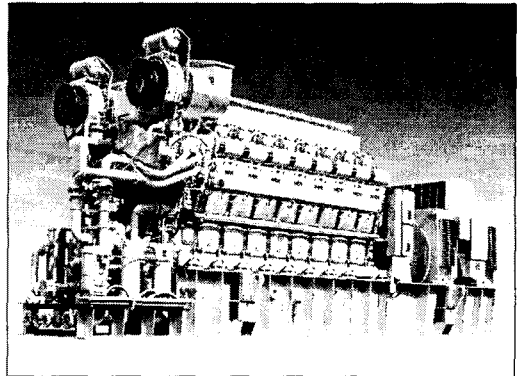


그림 8. 7,290kW급 디젤발전기, 16V32/40, STX  
Fig. 8 7,290kW Diesel Gen.Set, 16V32/40, STX

## 3. 결 론

본 논문에서는 디젤발전기의 병렬운전에 필요한 조건들을 살펴보고, 동기운전과 부하분담을 위해 주파수 제어를 위한 시스템 모델링을 수행하고, 이를 토대로 고성능, 저가격의 전용제어기를 설계 방안을 제안하였다. 앞으로의 연구는 제작될 하드웨어를 바탕으로 요구기능에 충실한 소프트웨어를 개발하여 제어기능과 성능을 평가하는 실증시험을 남겨두고 있다. 디젤발전기는 발전용량별로 제어 응답특성이 다르므로 사용자가 시운전 환경에서 제어 파라미터를 쉽게 조절할 수 있도록 기능 등을 추가할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] STX Corporation, "Plant Electrical and Control System", pp.16~25, 1997
- [2] 유희한, "모델 맷칭법에 의한 디젤기판의 속도제어", 한국박용기관학회 No.3 Volume 20, 1996
- [3] S.T.Lyngso, "Electronic governor system EGS900", CI900.166.623 Version 2.01, 1987